

# 丹江口水库入库径流特征及其演变规律

王元超, 王旭, 雷晓辉, 王浩

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 为了能够更好地进行中长期径流预报, 对 1965 年—2013 年的丹江口水库月平均入库流量进行径流特性分析。首先采用线性回归法和 Mann-Kendall 检验法进行趋势分析, 然后采用 Pettitt 突变检验法、Morlet 小波法分别进行突变分析与周期分析。结果表明, 1965 年—2013 年间丹江口径流量呈下降趋势, 并且分别存在 3~5 a、7~9 a、18~20 a 的显著周期性。建议进行中长期年径流预报时采用 7 a 或其倍数年做建模数据序列, 同时由于年径流与最大洪峰流量的突变点均为 1986 年, 所以尽量避免 1986 年, 以免影响预报精度。

**关键词:** 丹江口水库; 水文; 径流量; 洪峰; 汛期; 趋势; 突变; 周期

**中图分类号:** TV121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0015-05

## Inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir and its evolution

WANG Yuan-chao, WANG Xu, LEI Xiao-hui, WANG Hao

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to better predict the long-term runoff, the average monthly inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir from 1965 to 2013 were analyzed. The trend analysis was performed using the linear regression and Mann-Kendall test methods, the mutation analysis was performed using the Pettitt mutation test method, and the cycle analysis was performed using the Morlet wavelet method. The results showed that the inflow runoff in the Danjiangkou Reservoir has a decline trend from 1965 to 2013, and significant periodicity of 3~5, 7~9, and 18~20 years exists. The mutation point of annual runoff and maximum peak flow occurred in 1986; therefore, the data of 1986 are better avoided in order to ensure the prediction accuracy in the long-term annual runoff prediction. Moreover, the modeling data series of 7 years or its multiple are suggested to be applied in the long-term annual runoff prediction.

**Key words:** Danjiangkou Reservoir; hydrology; runoff; peak; flood season; trend; mutation; cycle

丹江口水库位于汉江中上游(属长江流域), 总面积 846 km<sup>2</sup>, 汉江的天然水位调节器。丹江口水库多年平均入库水量为 394.8 亿 m<sup>3</sup>, 水库来水量来自于汉江(丹江口以上的湖北西部、陕西南部部分, 多年平均来水约 388 亿 m<sup>3</sup>)和汉江的支流丹江(多年平均来水约 8.2 亿 m<sup>3</sup>)。2012 年大坝加高后, 水库正常蓄水位将从 157 m 提高至 170 m, 库容将从 174.5 亿 m<sup>3</sup> 增加到 290.5 亿 m<sup>3</sup>, 水域面积将达 1 022.75 km<sup>2</sup>。通过南水北调中线工程, 丹江口水库将向河南、河北、北京、天津等四个省市的 20 多座大中城市供水, 一期工程年

均调水 95 亿 m<sup>3</sup>, 中远期规划每年调水量将达 130 亿 m<sup>3</sup>, 将有效缓解中国北方的水资源严重短缺局面。

结合以往的文献可知, 径流特性分析是做径流预报的前提, 更精确仔细的径流分析可以更好地对流域进行中长期的径流预报。因此, 准确分析丹江口水库入库径流特性, 对于南水北调中线工程供水安全具有重要意义。通常径流特性分析包括三部分内容: 趋势分析、突变分析和周期分析。趋势分析常用的方法有线性回归法、滑动平均法、Mann-Kendall 检验法以及 R/S 分析法<sup>[1]</sup>, 如李保敏等人<sup>[2]</sup>使用 Mann-Kendall 法分析了清漳河流域内的径流特征。突变分析通常

收稿日期: 2014-07-25 修回日期: 2014-11-13 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1339.014.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026; 201101024; 201301001; 20131102); 国家科技支撑计划(2013BAB05B05); 环保部公益基金项目(2013467042); 国家重点基础研究发展计划(973 课题)(2013CB036406); 国家科技重大专项项目(2012ZX07205)

作者简介: 王元超(1990-), 男, 北京人, 主要从事水文洪水预报模型研究。E-mail: wych0720@126.com

通讯作者: 雷晓辉(1974-), 男, 陕西西安人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文洪水预报模型研究和水资源调度研究。E-mail: lxh@iwahr.com

采用 Pettitt 突变检验法,如刘嘉琦等<sup>[3]</sup>基于长江大通水文站 1950 年—2009 年逐日平均流量资料,运用 Pettitt 突变点检验法,对年、枯季、洪季、汛后及逐月平均流量序列进行突变点分析。周期分析一般使用小波法<sup>[4]</sup>,包括小波函数、小波变换、小波方差三个方面。2013 年雷廷、张兆吉<sup>[5]</sup>等人以海河平原 28 个四级子区 56 年的数据使用 Morlet 小波分析了变化周期。

本文选取丹江口水库站 1956 年—2013 年(共 58 年)月径流数据,拟采用线性回归法和 Mann-Kendall 检验法、Pettitt 突变检验法、Morlet 小波法,分别对年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量的年内分配特征、年代际变化和年际变化进行了分析,为水库中长期入库径流预报提供有力支持。从而实现水库优化运行,发挥防洪效益、调水效益和发电等经济效益的重要环节。并且直接关系到水库水资源调度和水库发电的综合调控方案的制定,影响水资源调度效果,为未来供水、发电、灌溉用水的预分配方案提供必要的前提。

### 1 径流年内分配特征

丹江口水库上游流域属亚热带季风气候区,降水的季节分配明显,夏雨最多,春雨次之,秋雨更次,冬雨最少,但冬季的雨量亦可占全年降水量的 10% 以上。汛期(5 月—10 月)入库径流量占全年径流量的 76.75%,而枯水期径流量(11 月—次年 4 月)仅占全年径流量的 23.25%;其中,枯水期前期(11 月—次年 2 月)径流量占全年径流量的 13.22%,后期(3 月—4 月)径流量占全年径流量的 10.02%(图 1)。该流域的春季有融雪发生,故 3 月、4 月径流量较 1 月、2 月有所增加;汛期中 7 月份的径流量比重最多,8 月、9 月份次之(图 2)。

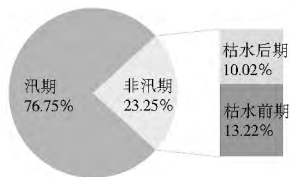


图 1 丹江口水库站流域径流年内分配特征

Fig. 1 Annual runoff distribution in the Danjiangkou Reservoir

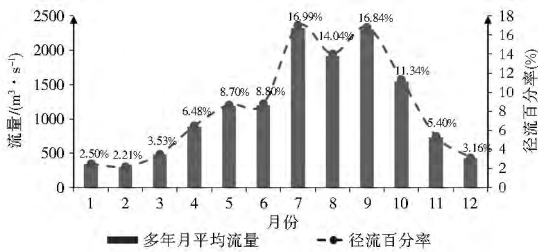


图 2 丹江口水库站流域各月平均流量趋势

Fig. 2 Monthly average flow trend in the Danjiangkou Reservoir

### 2 径流年代际变化分析

从丹江口以上流域径流量年代际变化(图 3)可以看出,1956 年—1959 年、20 世纪 60 年代、80 年代以及 2010 年—2013 年,该流域径流量多于多年径流量平均值,分别比多年平均值增加 4.14%、10.58%、23.07%、7.46%;20 世纪 70 年代、90 年代和 21 世纪初的径流量低于多年平均值,分别比

多年平均值减少 8.76%、25.42%、11.06%,即 90 年代最枯,80 年代最丰。

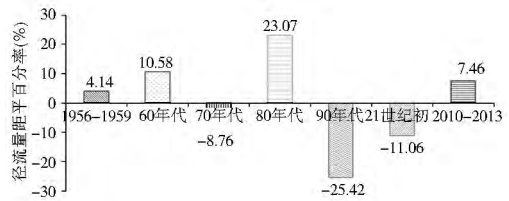


图 3 径流量年代际变化

Fig. 3 Inter-decadal variations of runoff

### 3 径流年际变化分析

#### 3.1 趋势分析

本文采用是由 Hamed<sup>[6]</sup>在 1998 年提出的一种修正的 Mann-Kendall 检验方法,其主要思想是修正了 Mann-Kendall 法的统计量方差  $Var(S)$ 。修正后的方差公式定义为

$$Var^*(S) = Var(S) \frac{n}{n^*} \quad (1)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i) \quad (2)$$

式中: $\rho_s(i)$ 是自相关序列的系数。

依据线性回归法进行趋势分析可知(图 4—图 7),该流域年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量均呈现为降低趋势;年径流在近 58 年间呈现不显著的降低趋势,降低率为 4.9006;汛期径流呈现出来的降低率为 44.991;非汛期的降低率为 13.986;最大洪峰流量降低率为 20.269。通过 Mann-Kendall 检验法也可以看出(表 1),该流域在近 58 年间也均呈现降低的趋势,年径流  $Z$  为 -1.3013;汛期径流  $Z$  为 -1.1672;非汛期径流  $Z$  为 -1.5495;而最大洪峰流量  $Z$  为 -1.7105。

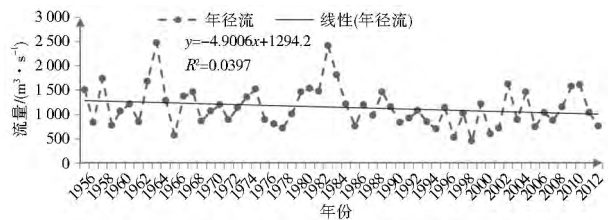


图 4 年径流变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual runoff

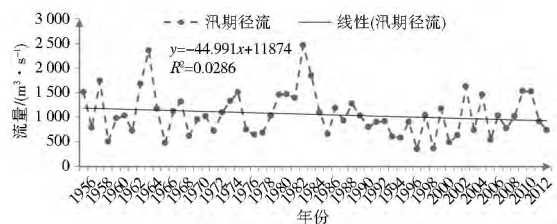


图 5 汛期径流变化趋势

Fig. 5 Variation trend of runoff in the flood season

#### 3.2 突变分析

采用 Pettitt 突变检验法<sup>[7]</sup>对丹江口径流序列进行突变分析。Pettitt 突变检验是一种非参数检验方法,突变点可能

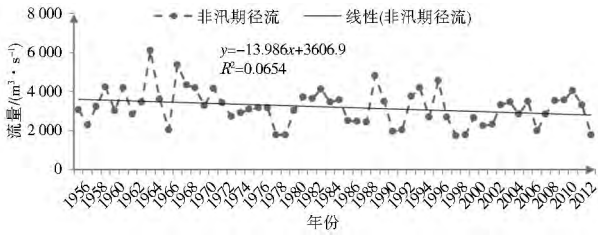


图 6 非汛期径流变化趋势

Fig. 6 Variation trend of runoff in the non-flood season

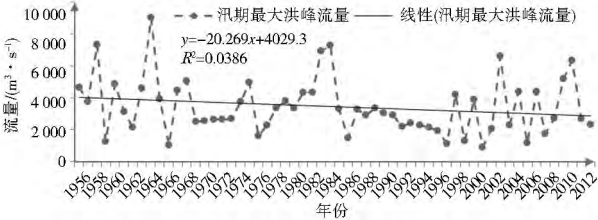


图 7 最大洪峰流量变化趋势

Fig. 7 Variation trend of maximum peak discharge in the flood season

的显著性水平  $p$  定义为

$$p = \exp\left(\frac{-6K_i^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (3)$$

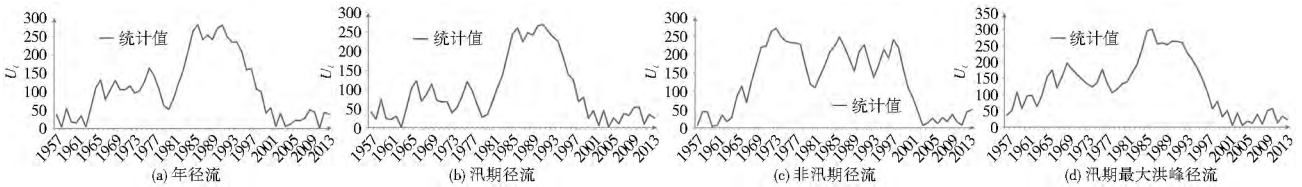


图 8 Pettitt 突变点检验统计量  $U_i$  序列值

Fig. 8 Values of Pettitt mutation test statistic  $U_i$

表 2 Pettitt 突变检验结果

Tab. 2 Pettitt mutation test results

序列	$K$	$t$	$p$	突变前后变化率(%)
年径流	282	1986	0.09	-20.35
汛期径流	269	1991	0.11	-22.39
非汛期径流	269	1973	0.11	-18.99
汛期最大洪峰流量	301	1986	0.06	-26.00

注:突变前后变化率=(突变后期-突变前期)/突变前期

### 3.3 周期分析

采用 Morlet 小波分析法<sup>[8]</sup>对丹江口水库站年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量进行周期性分析。Morlet 小波函数形式为

$$\Psi(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

式中: $\omega_0$  为常数( $\omega_0 > 5$ ); $i$  为虚数。

图 9、图 10 分别为年径流距平值的小波变换系数等值线和不同频域的小波变换系数图,可以看出,丹江口水库站年径流以 2~5 a、6~9 a 和 15~20 a 左右的周期变换较明显;周期变换中心在 3 a、7 a 和 18 a 左右。其中,3 a 周期变换中存在 16 个偏丰期和 15 个偏枯期,但是在 1987 年—1989 年之间出现了一个不符合周期性的点,所以 3 a 的周期变换有待质疑;7 a 左右为中心的周期变换存在 7 个偏丰期和 6 个偏枯期,18 a 左右为中心的周期变换存在 3 个偏丰期和 2 个偏枯期,同样都是偏丰偏枯交替变换。

表 1 径流变化趋势 M-K 检验结果

Tab. 1 M-K test results of runoff in the flood season

径流序列	线性回归	M-K 检验	
	$b$	$Z$	趋势
年径流	4.900 6	-1.3013	—
汛期径流	44.991	-1.1672	—
非汛期径流	13.986	-1.5495	—
最大洪峰流量	20.269	-1.7105	—

注:“+”代表上升,“-”代表下降

如果  $p$  小于给定的显著性水平(本文给定的显著性水平为 0.05),说明有显著突变点存在。

图 8 和表 2 为丹江口水库站年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量 Pettitt 突变检验结果。可以看出,丹江口水库站年径流和最大洪峰流量均在 1986 年发生了由多到少的突变,突变前后变化率分别为 -20.35% 和 -26.00%;而汛期径流在 1991 年发生了突变,非汛期径流在 1973 年发生突变,也均为由多到少,突变率分别为 -22.39% 和 -18.99%。年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量的突变显著水平  $p$  分别为 0.09、0.11、0.11、0.06,均大于 0.05,因此可以认为突变不显著。

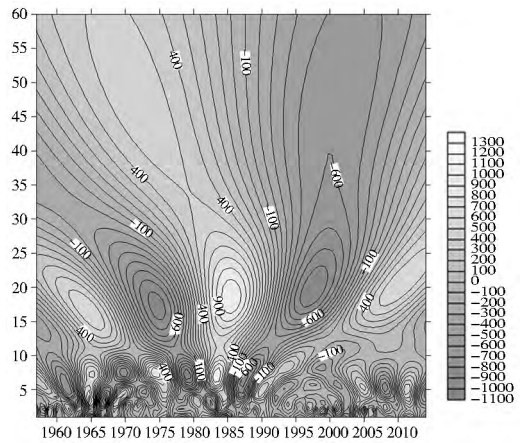


图 9 年径流小波变换系数等值线

Fig. 9 Wavelet transformation coefficients of annual runoff

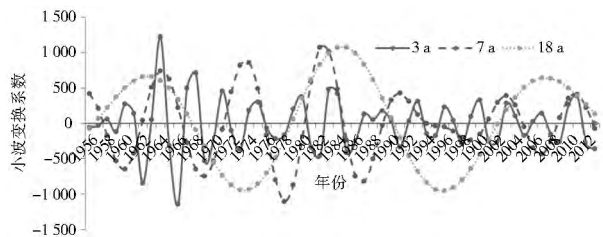


图 10 年径流不同频域小波变换系数

Fig. 10 Wavelet transformation coefficients of annual runoff with different frequencies

由汛期径流距平值小波变换系数等值线图(图 11)和不同频域的小波变换系数图(图 12)可以看出,汛期径流的周期变换中心分别为 5 a、7 a、19 a。5 a 的周期变换中有 9 个偏丰期和 9 个偏枯期;7 a 的周期变换中有 7 个偏丰期和 6 个偏枯期;19 a 周期变换中有 3 个偏丰期和 2 个偏枯期。汛期径流的 3 个变换周期均为偏丰偏枯交替变换。

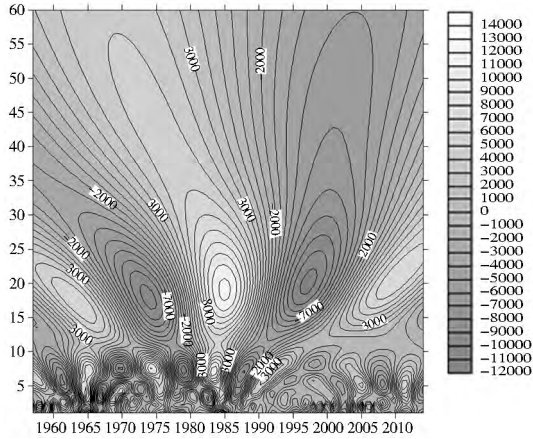


图 11 汛期径流小波变换系数等值线

Fig. 11 Wavelet transformation coefficients of runoff in the flood season

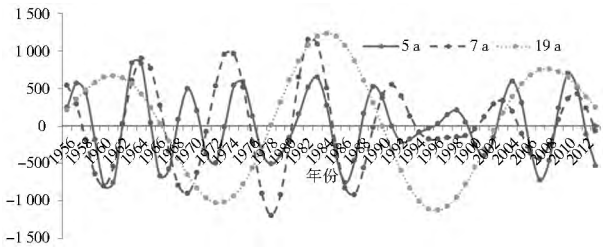


图 12 汛期径流不同频域小波变换系数

Fig. 12 Wavelet transformation coefficients of runoff with different frequencies in the flood season

图 13 和图 14 分别为非汛期径流距平值小波变换系数等值线图和不同频域的小波变换系数图,可以看出,变换中心为 5 a、9 a 和 18 a。5 a 的周期变换中有 9 个偏丰期和 9 个偏枯期;9 a 的周期变换中有 5 个偏丰期和 6 个偏枯期;18 年周期变换中有 3 个偏丰期和 2 个偏枯期。非汛期径流的 3 个变换周期也均为偏丰偏枯交替变换。

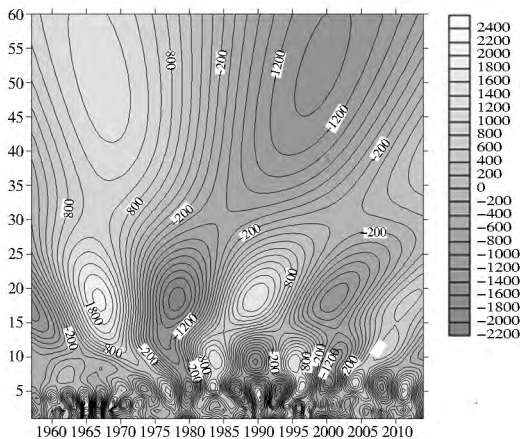


图 13 非汛期径流小波变换系数等值线

Fig. 13 Wavelet transformation coefficients of runoff in the non-flood season

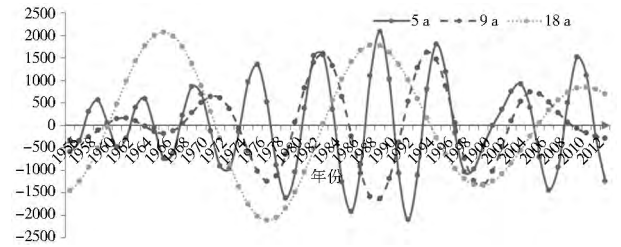


图 14 非汛期径流不同频域小波变换系数

Fig. 14 Wavelet transformation coefficients of runoff with different frequencies in the non-flood season

图 15 和图 16 为最大洪峰流量距平值小波变换系数等值线图和不同频域的小波变换系数图,可以看出,丹江口水库站最大洪峰流量也是在 4 a、7 a 和 20 a 左右的周期性变换均十分明显。4 a 周期变换中存在 11 个偏丰期和 10 个偏枯期,经历了丰枯交替变换;7 a 左右为中心的周期变换存在 7 个偏丰期和 6 个偏枯期,而 20 a 左右为中心的周期变换存在 3 个偏丰期和 2 个偏枯期。

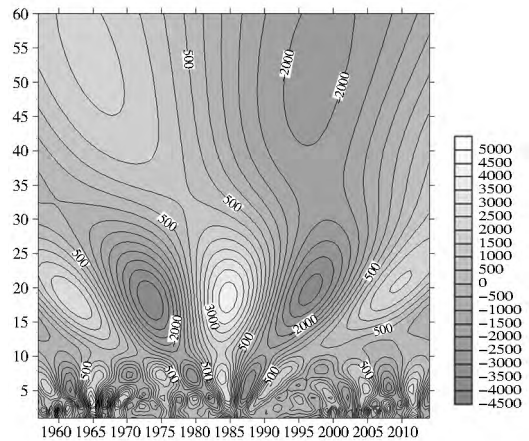


图 15 最大洪峰流量距平小波变换系数等值线

Fig. 15 Wavelet transformation coefficients of maximum peak discharge in the flood season

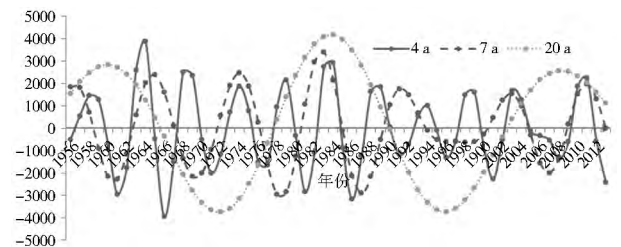


图 16 最大洪峰流量距平不同频域小波变换系数

Fig. 16 Wavelet transformation coefficients of maximum peak discharge with different frequencies in the flood seasons

## 4 结论

(1)丹江口水库汛期(5 月—10 月)入库径流量占全年径流量的 76.75%,其中,7 月份径流最多,占全年的 16.99%;9 月次之,占 16.84%;8 月占 14.04%;10 月占 11.34%。

(2)20 世纪 90 年代入库径流量最枯,比多年平均减少 25.42%;21 世纪初的径流量比多年平均减少 11.06%,这 20 年里年平均径流量大部分均低于多年平均径流量,直到 2010 年才有所好转。

(3)20世纪80年代汛期径流量最丰,比多年平均增加23.07%,而在1965年—2013年的58年里,径流突变点在1986年,该年径流量达到了一个最丰值。

(4)58年内,年径流、汛期径流、非汛期径流和最大洪峰流量四种要素均表现出下降趋势,周期比较显著的是3~5 a、7~9 a、18~20 a,但四种要素的变化周期均不相同,不过除非汛期径流以外均有7 a这个周期。由于该流域汛期径流量比重高于70%,因此在做中长期年径流预报时最好用7 a或其倍数年做建模数据序列。

参考文献(References):

[1] 张峰. 西江流域分布式水文模拟及其应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2012. (ZHANG Feng. Distributed hydrological modeling and application for Xijiang River[D]. Shanghai: Donghua University, 2012. (in Chinese))

[2] 李保敏, 张俊芝, 吴旭, 等. 基于 Mann-Kendall 法和有序聚类法的径流变化特征研究[J]. 海河水利, 2012(2): 37-38, 44. (LI Bao-min, ZHANG Jun-zhi, WU Xu, et al. Characteristics of runoff variation studies based on sequential clustering method and Mann-Kendall[J]. Haihe Water Resources, 2012(2): 37-38, 44. (in Chinese))

[3] 刘嘉琦, 龚政, 张长宽. 长江入海径流量突变性和趋势性分析[J]. 人民长江, 2013(7): 6-10. (LIU Jia-qi, GONG Zheng, ZHANG Chang-kuan. Yangtze River runoff into the sea and trend analysis of mutations[J]. Yangtze River, 2013(7): 6-10. (in Chinese))

[4] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG Wen-sheng, DING Jing, LI Yue-qing. Wavelet analysis of hydrological [M]. Beijing: Chemical industry press, 2005. (in Chinese))

[5] 雷廷, 张兆吉, 费宇红, 等. 海河平原 1956 年—2011 年降水特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 12(1): 32-36, 41. (LE Ting, ZHANG Zhao-ji, FEI Yu-hong, et al. Analysis of precipitation characteristics in the Haihe River plain from 1956 to

2011[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 12(1): 32-36, 41. (in Chinese))

[6] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998(204): 182-196.

[7] Pettitt A N. A Non-parametric Approach to the Change-point Problem[J]. Applied Statistic, 1979, 28(2): 126-135.

[8] 王宇晖. 基于分布式水文模型的流域水循环及面源伴生过程模拟研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2012. (WANG Yu-hui. Based on surface water cycle and associated source distributed hydrological model simulation research and application process [D]. Shanghai: Donghua University, 2012. (in Chinese))

[9] 蔺学东, 张锦铨, 姚治君, 等. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析[J]. 地理科学进展, 2007(3): 58-67. (LIN Xue-dong, ZHANG Yi-li, YAO Zhi-jun. Lhasa River basin runoff trend analysis in the past 50 years[J]. Progress in Geography, 2007(3): 58-67. (in Chinese))

[10] 耿万东. 丹江口水库可调出水量研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010. (GENG Wan-dong. Danjiangkou Reservoir adjustable amount of water research[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010. (in Chinese))

[11] 周小清. 丹江口水库入库径流中长期预报模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2011. (ZHOU Xiao-qing. Runoff forecasting model research term of the Danjiangkou Reservoir[D]. Nanjing: Hehai University, 2011. (in Chinese))

[12] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992(4): 482-493. (FU Cong-bin, WANG Qiang. Definition and detection of abrupt climate change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992(4): 482-493. (in Chinese))

[13] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. Research on climate change impacts on hydrology and water resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))

[14] Kendall M G. A new measure of rank correlation[M]. Biometrika, 1938, 30(1-2): 81-93.

### 《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿邮箱: www.nsbdkq.net, 电话: 0311-85020639, 5020535, 85020507, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部